

文章编号 1000-5013(2005)04-0377-04

# 方钢管混凝土柱的抗震性能分析

罗 漪 徐玉野 王全凤

(华侨大学土木工程学院, 福建 泉州 362021)

**摘要** 方钢管混凝土柱的抗震性能与钢管的局部屈曲有关, 柱端设置约束拉杆可以提高钢管的局部稳定, 从而增强方形钢管混凝土柱抗震性能. 采用三维有限元法, 分析方钢管混凝土柱在竖向及水平荷载联合作用下的抗侧力-位移关系, 有限元分析的结果得到试验结果验证. 利用有限元模型分析轴压比、钢板宽厚比, 以及内填混凝土抗压强度对方钢管混凝土柱抗震性能的影响. 完成柱端设置约束拉杆的方形钢管混凝土柱在竖向及水平荷载联合作用下三维有限元分析, 与试验结果相比较并作分析.

**关键词** 方钢管, 混凝土柱, 抗震性能, 有限单元法

中图分类号 TU 375.3; TU 312+.1

文献标识码 A

方、矩形钢管混凝土的破坏一般始于钢管壁的局部屈曲, 如何延缓钢管壁的局部屈曲并降低钢管壁局部屈曲后的钢管混凝土柱的性能退化, 一直是研究的热点问题<sup>[1~3]</sup>. 本文拟用三维有限元法分析方钢管混凝土柱和柱端带约束拉杆的方钢管混凝土柱, 及其在单调增加的水平荷载和垂直荷载联合作用下的抗侧力-位移关系.

## 1 约束拉杆的方形钢管混凝土柱抗震性能

广东省建筑设计研究院和华南理工大学提出在方、矩形及异形钢管混凝土柱中设置约束拉杆, 从而形成带约束拉杆的异形钢管混凝土柱. 它利用约束拉杆在一定程度上限制了钢管壁的局部屈曲, 进而增

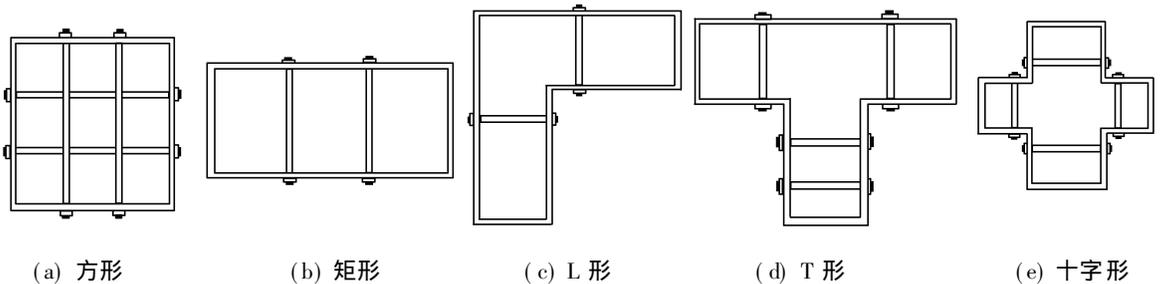


图 1 带约束拉杆的异形钢管混凝土柱

强钢管壁的局部稳定性, 增强了钢管壁对核心混凝土的约束作用. 研究表明, 带约束拉杆的异形截面钢管混凝土柱, 外包钢管和核心混凝土能牢固地结合, 协调变形并共同工作. 约束拉杆能够大大提高异形钢管混凝土柱的轴压极限承载力<sup>[4]</sup>, 带约束拉杆的异形钢管混凝土柱有方形、矩形、L形、T形、十字形等形式<sup>[5]</sup>, 如图 1 所示. 它已成功应用于广州市新中国大厦、广州市名汇商业大厦、江门中旅大厦等大型建筑工程. Hsu<sup>[6]</sup> 提出在柱端部设置约束拉杆, 以提高方钢管混凝土柱的抗震性能, 进行了端部设置约束拉杆的方钢管混凝土柱在竖向及水平反复荷载作用联合的试验研究(图 2). 试验表明, 在垂直荷载和反复荷载作用联合下, 柱端部率先进入塑性阶段, 与无约束拉杆相比, 构件的延性和耗能能力明显提高. 目前, 国内约束拉杆都是沿着杆件全长布置, 研究主要集中在轴压和偏压的情况. Hsu 的建议只需在方钢管混凝土柱的端部设置一层或两层的约束拉杆. 由此可见, 国内外观点不同, 这类构件的详细力学特

收稿日期 2004-12-29

作者简介 罗 漪(1976), 女, 讲师, 博士研究生, 主要从事计算结构力学的研究. E-mail: luoluoyi@163.com

基金项目 福建省建设厅科研基金资助项目(闽建科[2001]44号)

性还有待深入研究.

## 2 方钢管混凝土柱有限元分析

### 2.1 有限元模型

考虑钢板和混凝土的位移协调, 钢板和核心混凝土均采用具有 8 节点的实体单元建模.

即钢板采用 Solid 45 单元, 混凝土采用 Solid 65 单元. 这两种单元的每个节点都具有  $X, Y,$

$Z$  方向的 3 个自由度. Solid 45 单元具有考虑塑性变形、徐变、膨胀、应力强化和大变形的能力. 钢板和约束拉杆材料模型, 均采用经典双线性随动强化 Bkin 模型, 混凝土考虑裂缝产生和压碎并采用线性的本构关系. 本文分析取试件的  $1/2$  来建模. 柱底端的所有节点约束 3 个方向的平移自由度, 柱顶施加分布压力并施加水平位移. 有限元分析假定钢板与混凝土之间完全粘结, 没有发生滑移, 也不考虑加载过程中混凝土和钢板的泊松比的变化.

### 2.2 与试验结果对比

本文对文 [7] 中编号为 U45-1 和 U45-3 的试件进行有限元分析. 该方形钢管混凝土柱长度为 1 840 mm, 截面尺寸 280 mm × 280 mm, 钢板厚度 6 mm, 名义轴压比分别为 0.1 和 0.3. Solid 45 单元泊松比为 0.3, 弹性模量为 0.2 TPa, 屈服应力 321 MPa, 塑性模量 10 MPa; Solid 65 单元泊松比 0.2, 弹性模量 33.25 GPa, 裂缝张开剪力传递系数为 0.5, 裂缝闭合剪力传递系数为 0.1, 单轴抗压强度 28.9 MPa, 单轴抗拉强度为 2.47 MPa. 有限元分析所用的单调增加的水平位移荷载步 ( $A$ ), 如图 3 所示. 有限元分析得到的力 ( $F$ ) - 位移 ( $D$ ) 关系与试验在反复单调增加的位移荷载和垂直荷载联合作用下的力-位移包络线的对比, 如图 4 所示. 从图 4 可以看出, 有限元分析结果与试验结果吻合比较好. 当位移比较小的时候,



图 2 设置约束拉杆的方钢管混凝土柱在垂直反复荷载作用下的失效模式

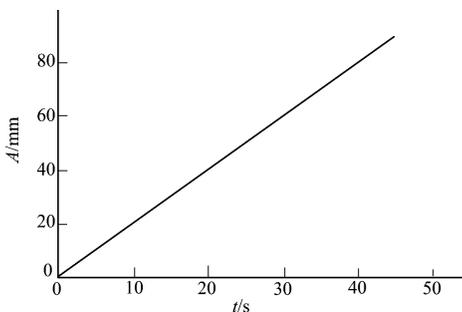


图 3 有限元分析所用的位移荷载步

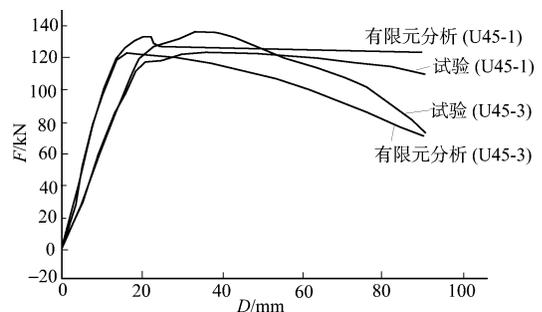


图 4 有限元分析和试验的比较

时候, 由于本文采用线性本构关系, 因而有限元的屈服位移比试验小. 试验是低周反复递增荷载, 而本文是单调增加位移荷载, 因而试验产生的刚度退化大于有限元分析的结果. 由于本文采用的混凝土单元能够考虑混凝土由于压碎而退出工作, 因此有限元分析得到了力-位移关系的下降段.

## 3 方形钢管混凝土的抗震性能影响分析

改变试件的轴压比、宽厚比、长细比和内填混凝土抗压强度, 利用本文的有限单元模型进行分析, 考察这些因素对方形钢管混凝土抗震性能的影响.

### 3.1 轴压比对方形钢管混凝土抗震性能的影响

对 1 600 mm 高的方形钢管混凝土柱, 其截面尺寸为 300 mm × 300 mm; 混凝土强度为 C40, 轴心抗压强度为 26.8 MPa, 轴心抗拉强度为 2.39 MPa, 弹性模量为 32.5 GPa. 钢材的屈服强度 0.31 GPa, 弹性模量 0.2 TPa. 利用有限元分析得到各种情况下的力-位移关系, 如图 5 所示. 图中, 曲线 1~5 的轴压比分别为 0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7. 从图 5 可以看出, 轴压比对方钢管混凝土的抗侧力-位移关系有非常大的影响, 从而影响了构件的抗震能力. 随着轴压比的增大, 屈服位移略有提前, 屈服位移所对应的抗侧力略有降低, 轴压比对下降段刚度影响非常大. 当轴压比为 0 时, 不出现下降段; 随着轴压比的增大, 下降段

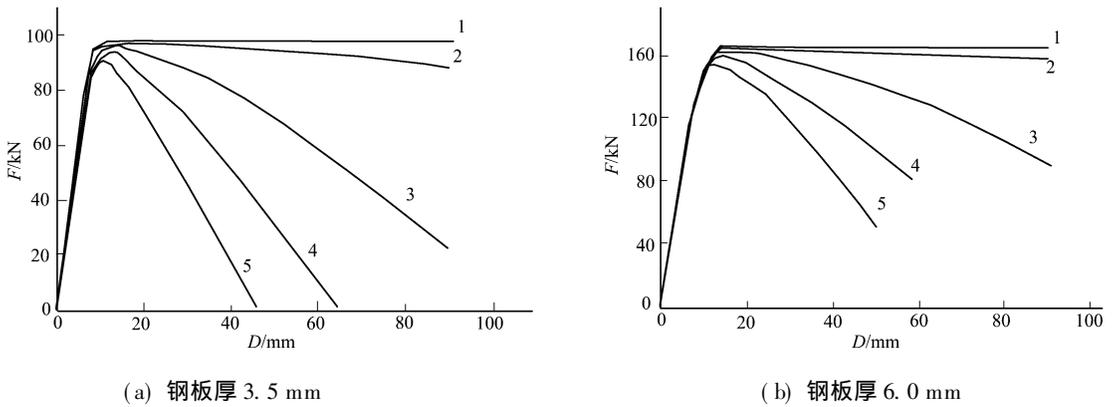


图5 不同轴压比和钢板厚下方钢管混凝土柱抗侧力-位移关系

刚度不断降低, 极限位移相应地减少, 从而位移延性急剧降低。

### 3.2 宽厚比对方形钢管混凝土抗震性能的影响

从图5可以看出, 随着钢板厚增大, 柱屈服位移相应增大, 屈服位移所对应的抗侧力有较大提高. 对应钢板厚3.5 mm和6.0 mm, 屈服位移所对应的抗侧力为100 kN和160 kN. 同时, 随着钢板厚的增大, 增大了方钢管混凝土进入下降段后的刚度, 但提高不大。

### 3.3 内填混凝土抗压强度对方钢管混凝土抗震性能的影响

假设方钢管混凝土柱的截面尺寸为300 mm × 300 mm, 高为1600 mm, 钢材的屈服强度310 MPa, 弹性模量0.2 TPa, 钢板厚度6 mm, 其抗侧力-位移关系, 如图6所示. 图中, 曲线1~7的混凝土强度分别为C35, C40, C45, C50, C55, C60和C65. 从图6可以看出, 内填混凝土强度对方钢管混凝土柱的抗侧

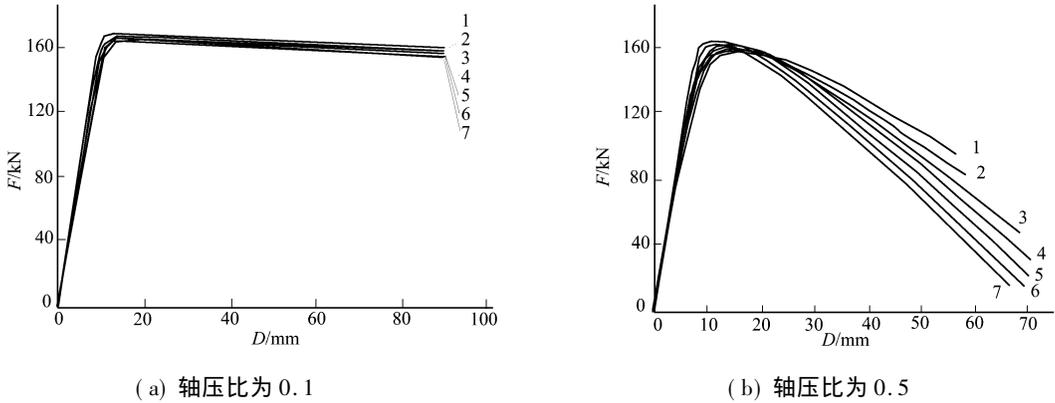


图6 内填混凝土强度对方钢管混凝土抗侧力-位移关系的影响

力-位移关系没有太大的影响. 对于相同轴压比的情况, 随着内填混凝土强度的提高, 屈服时候的抗侧力略有提高, 但提高不大. 当轴压比较大的时候, 内填混凝土强度的提高会显著地影响结构下降段的刚度, 加剧方钢管混凝土的强度退化. 当垂直压力相同时, 内填混凝土强度的提高只是略微提高屈服承载力, 对下降段的刚度基本上不影响. 这与文[3]的试验结果有一定出入, 文[3]试验认为内填混凝土强度除影响试件的承载力外, 对试件的延性也有较大的影响。

## 4 带约束拉杆的方钢管混凝土柱有限元分析

### 4.1 有限元模型

在方钢管混凝土柱有限元分析的基础上, 增设约束拉杆和垫板. 约束拉杆用Link 8单元模拟, 约束拉杆采用经典双线性随动强化Bkin准则. 由于在柱端部较小的范围内设置约束拉杆, 且实际的垫板尺寸较小, 而约束拉杆的端部又必须在垫板的中心. 因此, 垫板至少要划分为4个网格. 总之, 柱端部特别是约束拉杆附近的有限元网格尺寸较小, 这给非线性分析的收敛带来困难。

### 4.2 与试验结果对比

本文对Hsu的编号为D45-1和D45-3的柱端带两层约束拉杆方钢管混凝土柱试件, 进行有限元

分析. Solid 45 和 Solid 65 单元中输入参数同前, Link8 单元的材料特性与 Solid 45 相同. 有限元分析所用的单调增加的水平位移荷载步, 如图 3 所示. 在单调增加的位移荷载和垂直荷载联合作用下, 有限元分析得到的力-位移关系和试验反复单调增加的位移荷载和垂直荷载联合作用下的力-位移包络线结果的对比, 如图 7 所示. 图中, 曲线 1~4 分别为 D45-1, U45-1, D45-3, U45-3 的有限元分析; 曲线 5, 6 分别为 D45-1, D45-3 的试验. 从图 7 可以看出, 有限元分析的结果与试验结果吻合比较好, 柱端设置约束拉杆不增加构件弹性刚度和屈服抗侧力, 可以较大地降低方钢管混凝土进入下降段后的刚度, 明显改善延性.

## 5 结束语

本文对钢板和约束拉杆, 采用经典双线性随动强化 Bkin 应力应变关系; 混凝土采用线性本构关系, 并考虑混凝土的压碎. 这样的简化三维有限元数值分析降低了非线性分析收敛的困难. 利用有限元对方钢管混凝土和柱端带约束拉杆的方钢管混凝土柱在水平荷载和垂直荷载联合作用下, 进行了三维有限元分析, 有限元分析的结果得到试验结果的验证. 本文也利用该有限元模型研究了方钢管混凝土柱和柱端带约束拉杆的方钢管混凝土柱的抗震性能, 得到相关结论. 本文的有限元模型能够较好地算出极限抗侧力和柱构件进入下降段后的情况, 但与实际情况相比, 具有屈服台阶较短的缺陷. 这有待于适合方钢管混凝土柱中约束核心混凝土三维本构关系的进一步研究.

## 参 考 文 献

- 1 Kitada K. Ultimate strength and ductility of state of the art concrete filled steel bridge piers in Japan[J]. Engineering Structures, 1998, 20(46): 347~ 354
- 2 韩林海. 钢管混凝土结构[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 218~ 289
- 3 吕西林, 陆伟东. 反复荷载作用下方钢管混凝土柱的抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(2): 2~ 11
- 4 陈德明, 苏恒强, 蔡 健. 带约束拉杆钢管混凝土柱受压性能的研究[J]. 南昌水专学报, 2003, 22(3): 38~ 40
- 5 陈宗弼, 陈 星, 叶群英. 广州新中国大厦结构设计[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(3): 2~ 9
- 6 Hsu H L, Yu H L. Seismic performance of concrete filled tubes with restrained plastic hinge zones[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59: 587~ 608
- 7 Sakino K, Tomii M. Hysteretic behavior of concrete filled square steel tubular beam columns failed in flexure[J]. Trans of the Japan Concrete Institute, 1981, (3): 439~ 446

## Analys on the Aseismic Behavior of Square Steel Tube Concrete-Filled Column

Luo Yi      Xu Yuye      Wang Quanfeng

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, 362021, Quanzhou, China)

**Abstract** The aseismic behavior of square steel tube concrete filled column is related to the local stability of steel tube, the stability can be improved by installing confining rods at the end of column, thus the aseismic behavior of the column can also be strengthened. Using 3D nonlinear finite element method (FEM), the authors analyze the relationship between the horizontal force and its displacement of the column under vertical force. The FEM results are in agreement with experiment ones, indicating the validity of FEM analysis. The influences of axial compressive ratio, width thickness ratio of steel plate of tube, and the strength of filled concrete on the aseismic behavior of the column are discussed. Furthermore, the analysis of 3D nonlinear FEM on the square steel tube concrete filled column with confining rods under both vertical and horizontal forces, are carried out, its FEM results are also compared with the experiment ones.

**Keywords** square steel tube, concrete filled column, aseismic behavior, finite element method

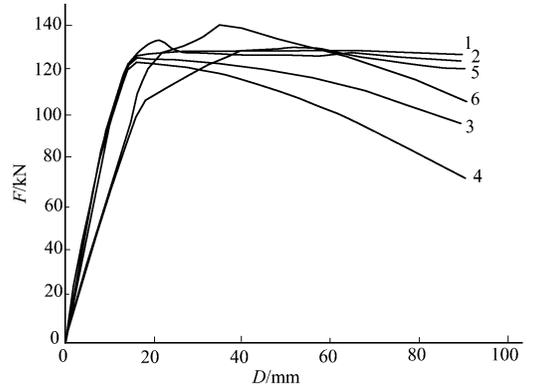


图 7 带约束拉杆的方形钢管混凝土柱的力-位移关系